

# Spin-up of massive classical bulges during secular evolution

Kanak Saha<sup>1</sup>\*, Ortwin E. Gerhard<sup>2</sup>, & Inma Martinez-Valpuesta<sup>3,4</sup>

1. Inter University Centre for Astronomy and Astrophysics, Post Bag 4, Ganeshkhind, Pune 411007, India
2. Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Giessenbachstrasse, D-85748 Garching, Germany
3. Instituto de Astrofísica de Canarias, E-38205 La Laguna, Tenerife, Spain
4. Universidad de La Laguna, Dpto. Astrofísica, E-38206 La Laguna, Tenerife, Spain

**ABSTRACT**  
 We use self-consistent N-body simulations to study the interaction of massive classical bulges (CIBs) with a bar that forms self-consistently in the disc. We show that the CIB gains significant angular momentum from the bar which, surprisingly, scales approximately linearly with the CIB mass. It is also tightly correlated with the ratio of the bulge size to the bar size. Most of the angular momentum gain occurs via low-order resonances, particularly 5 : 2 resonant orbits. A density wake forms in the CIB which corotates and aligns with the bar at the end of the evolution.  
 The spin-up process creates a characteristic linear rotation profile and mild tangential anisotropy in the CIB. The induced rotation is small in the centre but significant beyond ~ 2 bulge half mass radii, where it leads to mass-weighted  $V/\sigma \sim 0.2$ , and reaches a local  $V_{\max}/\sigma_{1n} \sim 0.5$  at around the scale of the bar. In all models a box/peanut bulge also forms suggesting that composite bulges may be common.

- イントロダクション
  - N体シミュレーションを用いて、barの重力相互作用による MassiveなClassical Bulge(以下、CIB)の角運動量の変化を調査
- シミュレーション
  - 初期条件：CIBは無回転、dispersion dominated

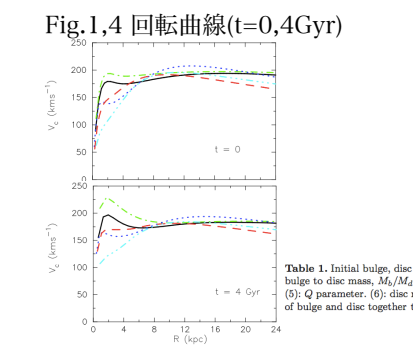


Fig. 1, 4 回転曲線(t=0, 4Gyr)

Tab.1 各シミュレーションのパラメータ

Models	$M_b/M_d$	$R_b/R_d$	$R_{b,1/2}/R_d$	Q	$M_d$ ( $10^{10} M_\odot$ )	$M_h/M_d$	$R_h/R_d$	$V_{c,d}/V_{c,tot}$
RCG076	0.113	2.09	0.214	1.51	2.00	10.97	2.02	0.474
RCG110	0.156	0.81	0.176	1.77	2.70	5.51	1.28	0.568
RHG109	0.180	0.65	0.138	2.84	2.70	6.87	2.51	0.566
RCG101	0.229	1.06	0.207	1.60	5.15	6.68	1.37	0.814
RCG116	0.239	1.19	0.210	1.65	4.98	7.49	1.88	0.748
RCG100	0.266	1.07	0.204	1.41	4.56	7.49	1.01	0.780
RHG112	0.348	1.03	0.199	2.47	2.55	9.44	2.24	0.605
RHG099	0.390	1.08	0.218	1.91	3.17	10.0	1.08	0.688
RHG097	0.432	1.22	0.235	1.84	3.11	7.88	1.66	0.692

Table 1. Initial bulge, disc and halo model parameters, ordered by the ratio of CIB to disc mass. Column (1): model name. (2): Ratio of bulge to disc mass,  $M_b/M_d$ . (3), (4): tidal radius  $R_b$  and half-mass radius  $R_{b,1/2}$  of the initial CIB, normalized by disc scale-length  $R_d$ . (5): Q parameter. (6): disc mass. (7): mass of dark matter halo  $M_h$ , in units of  $M_d$ . (8): Halo core radius, in units of  $R_d$ . (9): contribution of bulge and disc together to the total circular velocity at 2.2  $R_d$ .

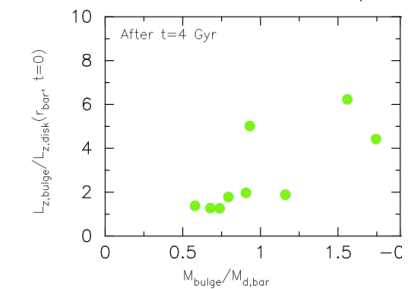


Fig. 17L CIB/Bar質量比とトータルの角運動量増分の関係(t=4Gyr)

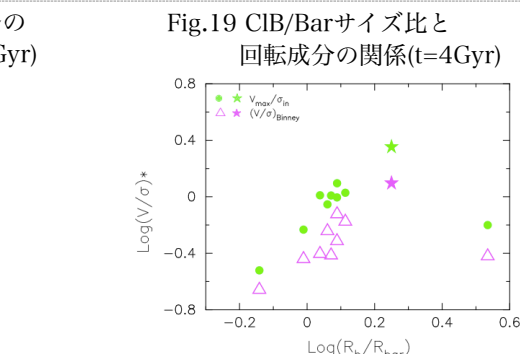


Fig. 19 CIB/Barサイズ比と回転成分の関係(t=4Gyr)

## 結果

- 角運動量輸送
  - バルジは主に5:2の共鳴軌道で角運動量を獲得している
  - 一方、2:1の軌道では恒星の個数が多いが角運動量は失われている

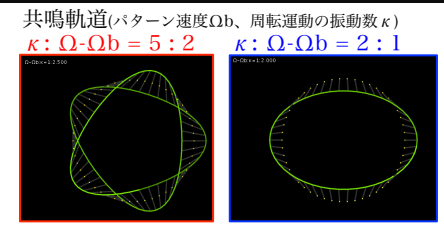


Fig.6 Orbital spectral analysis (RHG097)

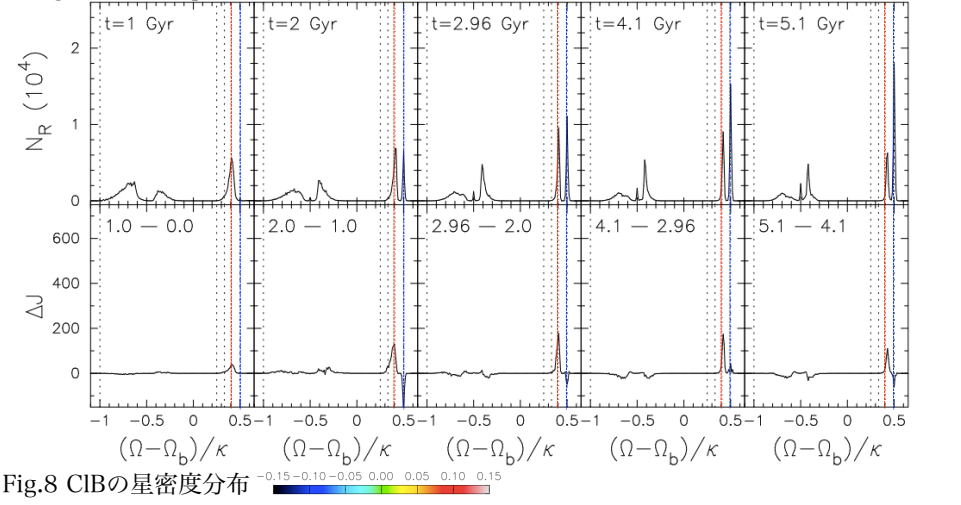


Fig.8 CIBの星密度分布

- 2:1の共鳴軌道により、CIBの密度分布はFig.8のようになる
- 分布の稜線(実線)は最初(t<3Gyr)、Barの軸(点線)より先を行く
- 最終的に密度分布はBarの軸(点線)に沿ってくる

## 結論

- 重力相互作用によりBarからCIBへGyrのタイムスケールで角運動量がsignificantに輸送されることがわかった
- トータルの角運動量増分はCIBの質量にほぼ比例する
- CIBの回転成分はCIBのサイズに比例する
  - ただし、大きすぎるとあまり回転しない
- CIB内の多くの星が  $\kappa: \Omega - \Omega_b = 2:1$  の共鳴軌道を周回するが、角運動量の輸送は主に5:2の共鳴軌道で行われる
- CIB内の星の密度分布は、最終的にBarに沿ったものに変化していく